

Tabu 搜索算法在电话网智能管理中的应用*

邵亮¹, 李磊¹, 陈嫦娟²

¹(中山大学 软件研究所, 广东 广州 510275);

²(广东省电信公司, 广东 广州 510000)

E-mail: L_Siu@163.net

http://www.zsu.edu.cn

摘要: 针对电话网智能管理系统中动态路由方案的实现,研究了采用 Tabu 搜索算法解决路由方案的问题.对 Tabu 搜索算法作了改进,使得它可以用来解决电话网的电路自动调度问题,并且得到了较好的结果.改进后的 Tabu 算法与遗传算法相比,能够在较短的时间内计算得到全局优化的路由方案.该算法正在广东省电话网智能管理系统中所使用.

关键词: Tabu 搜索;电话网管理;动态路由;组合优化问题;遗传算法

中图法分类号: TP393 **文献标识码:** A

电话网管理的一个主要任务是对交换网络中交换机的迂回路由进行实时和定期配置.随着交换网络设备的日趋复杂,网管工作已经难以再由网管专家手工完成,实际工作要求实现计算机自动完成的智能网管.广东省内的长途电话网已基本完成了由二级分级结构向无级网的过渡,这就对能够提高资源利用率和网络接通率的动态路由策略产生了需求.国外现有的动态路由策略^[1,2]对广东省电话网并不适用,因此广东省电话网智能管理系统开发项目组采用了集中式的全局优化策略.这要求在算法上解决两个问题:(1) 如何得到全局优化的路由选择方案;(2) 如何在尽量短的时间内计算出路由选择结果.

我们使用遗传算法较好地解决了第 1 个问题^[3,4],但由于遗传算法运算量过大,致使第 2 个问题没有得到很好的解决.Tabu 搜索算法在解决类似的组合优化问题上效果较好^[5-7].因此,我们希望把 Tabu 搜索算法应用在动态路由问题上.基本的 Tabu 算法是不能直接用于解决路由方案问题的,所以我们对算法作了一些改进.我们把 Tabu 表中一个元素表示一点改为表示一个范围,对路由方案问题的解空间作了重构,定义了路由方案转换函数 $H(R)$,使 Tabu 搜索算法中搜索空间的范围和邻域等概念得到了具体的定义.实验结果表明,改进后的 Tabu 算法很好地解决了以上两个问题.

1 问题的描述

在长途电话网中,全局优化的动态路由策略是这样实现的:系统每隔一段时间根据当前全网络的状况计算出一个全局优化的路由选路方案,重新调整网络中所有交换点的选路.这里的一个关键问题就是如何在短时间内计算得到最佳或较佳的选路方案.电话网上每个交换点到其他每个交换点都需要配置一个中转交换点,在话务溢出的情况下,话务可以通过中转交换点传送,从而使电话网络的接通率提高.如何配置中转路由才能尽可能地提高接通率呢?我们称该问题为路由方案问题.

电话网包括 n 个交换点,每个发端交换点至至端交换点之间由一条直达链路相连,而直达链路是由 l 条中继($l \geq 0$)组成.交换点与链路构成电话网络可以用一个有向加权全连通图 $T=(N,L)$ 表示.其中, N 是节点的集合,这

* 收稿日期: 2000-12-09; 修改日期: 2001-12-13

作者简介: 邵亮(1974 -),男,广东南海人,硕士,主要研究领域为人工智能,数据库,知识库;李磊(1951 -),男,湖南益阳人,博士,教授,博士生导师,主要研究领域为应用数学,计算机软件;陈嫦娟(1957 -),女,山东莒南人,高级工程师,主要研究领域为计算机与通信.

里表示交换点的集合. L 是边的集合,表示交换点之间的直达链路的集合.我们用 l_{ij} 表示节点 i 到节点 j 的直达链路的中继数量,则对应有向边 (i,j) 的权值是 $l_{ij}(i \neq j)$.每对交换点之间需要传送话务流量,单位为爱尔兰(Erlang),用 $t_{ij}(i \neq j)$ 表示从节点 i 出发到达节点 j 的话务量.

对于从交换点 i 到 j 的话务,如果超过 i,j 间直达链路所能承受的话务量,就会产生话务溢出,此时需将溢出话务通过一个中转交换点 k 迂回,即溢出话务通过 i,k 之间和 k,j 之间的直达链路来传送.所有的交换点到其他所有的交换点都可以选择中转交换点,所以共有 $n(n-1)$ 个路由需要选择.我们用 $r_{ij}(i \neq j)$ 表示节点 i 到节点 j 的中转节点, r_{ij} 可以取除去 i,j 后的所有节点中的一个,也可以为空,表示不选中转节点.问题的求解就是确定所有的 r_{ij} ,令网络的溢出率最小.

一个路由方案可以表示为矩阵 $R=(r_{ij})_{n \times n}$,其中 $r_{ij}(i=j)$ 可以取任意值,这里均取0.已知电话网所有交换点间的中继数和话务量,给定一个路由方案,我们可以通过评估函数对网络的话务溢出率来作一个评估^[3,4].对每一路由的确定都会对其他路由的选择产生影响,因此路由之间是相关的.

路由方案问题是一个组合优化问题.问题的状态空间大小为 $(n-1)^{n(n-1)}$.对一般长话网来说,其节点数都大于10.可见问题的状态空间是非常庞大的.由于问题复杂度大,要找出最优解一般是不可能的,一般情况下只要求找出近似最优解即可.解决该类组合优化问题的常用方法有遗传算法、模拟退火算法和Tabu搜索算法等.这里,我们使用Tabu搜索算法解决该类问题取得了较好的效果.

2 Tabu搜索算法及其存在的问题

Tabu搜索是F.Glover归纳提出的一种启发式的优化搜索算法^[5],自提出以来得到了大量的应用,在解决包括组合优化问题在内的许多问题中得到了较其他算法更好的结果^[6-8].Tabu搜索也可以作为一种元策略(metastrategy),与其他启发式搜索算法所结合使用,从而提高搜索的效率.

Tabu搜索的核心在于对搜索过程使用短期记忆和中长期记忆,以令搜索具有广泛性和集中性.其基本思想是搜索可行的解空间,在当前解的邻域中找到另一个更好的解.但是为了能够逃出局部极值和避免循环,算法中设置了禁止表,当搜索的解在禁止表中时,则放弃该解.Tabu搜索算法可以灵活地使用禁止表记录搜索过程,从而使搜索既能找到局部最优解,同时又能越过局部极值得到更优的解(参看文献[5,8,9]).

但实验表明,以上基本的Tabu算法直接使用在路由方案问题上还有一定的困难:状态空间仍然过大,禁止表的作用不大;当前解的邻域难以定义.为了克服上述困难,我们令禁止表中的元素表示状态空间中一个范围,该范围内的所有点都是禁止的,加大禁止表所能起到的作用.同时,我们将问题的状态空间通过一个映射作了重构,在重构的状态空间里,当前解的邻域和范围的概念都可以得到适当的定义.

3 状态空间的重构

定义序数函数 $\text{Order}(a_i, A)$ 如下:

$$\text{Order}(a_i, A) = |\{k | a_k = a_i \text{ 且 } k \leq i \text{ 或 } a_k < a_i, \text{ 对所有 } 1 \leq k \leq n\}|,$$

其中 $A=(a_1, a_2, \dots, a_n)$,是包含 n 个实数的有序序列.

序数函数实际上表达了 a_i 在序列 A 中的大小顺序,序数函数 $\text{Order}(a_i, A)$ 的值就是 A 中的元素从小到大排序后 a_i 所在的位置.对于大小相等的元素,序号小的位置靠前.

设话务由交换点 i 出发,到达交换点 j ,通过中转交换点 k 转接,即 $r_{ij}=k$,且 i 到 k 的话务量是 t_{ik} ,中继数是 l_{ik} ; k 到 j 的话务量是 t_{kj} ,中继数是 l_{kj} .定义空闲指标 $f(i,j,k)$ 为

$$f(i,j,k) = (l_{ik} + l_{kj})(1 - B(t_{ik}, l_{ik}))(1 - B(t_{kj}, l_{kj})),$$

其中函数 $B(t, l)$ 是Erlang-B公式, t 是话务量, l 是中继数.Erlang-B公式是话务理论中的常用公式.已知话务量 t 和中继数 l ,可以通过Erlang-B公式计算话务溢出率^[3].这里的空闲指标是一个经验公式,公式表达了对中转节点和中转链路的转接能力所作的一个评估,如果链路越空闲,空闲指标就越高,表明该中转节点和链路的转接能力就越强.实际使用中,我们还可以加上一些下限条件,若中继数少于一定数量时,则设空闲指标为0,表示中转节点

和中转链路没有转接能力.

定义有序序列 A_{ij} 为

$$A_{ij}=(f(i,j,1),f(i,j,2),\dots,f(i,j,i-1),f(i,j,i+1),\dots,f(i,j,j-1),f(i,j,j+1),\dots,f(i,j,n)).$$

实际上, A_{ij} 就是除去 $f(i,j,i)$ 和 $f(i,j,j)$ 后所有 $f(i,j,k), 1 \leq k \leq n$ 按 k 的顺序排列.

对每个交换点从 1 到 n 编号,并规定空转接为 0.定义转换函数 $H(i,j,k)$ 为

$$H(i,j,k)=\begin{cases} \text{Order}(f(i,j,k),A_{ij}), & \text{当 } 0 < k \leq n, k \neq i, k \neq j, \\ 0, & \text{当 } k = 0. \end{cases}$$

其中 i 是发端交换点, j 是到端交换点.

对一个路由方案矩阵 R , 去除矩阵对角线上的元素, 从上到下地将每行的元素从左到右按顺序排列, 并对每个元素使用转换函数 $H(i,j,k)$, 得到一个新的向量. 定义路由方案的转换函数 $H(R)$ 为

$$H(R)=(H(1,2,r_{12}),H(1,3,r_{13}),\dots,H(1,n,r_{1n}),H(2,1,r_{21}),H(2,3,r_{23}),\dots, \\ H(2,n,r_{2n}),\dots,H(n,1,r_{n1}),H(n,2,r_{n2}),\dots,H(n,n-1,r_{n,n-1})).$$

可以容易地证明, 转换函数 H 将原问题的状态空间映射到 $\{0,1,\dots,n-2\}^{n(n-1)}$ 的空间上, 并且该映射是一一映射. 在新的状态空间中, 每个点都代表不同的路由方案, 并且可以用一个 $n(n-1)$ 维的坐标表示.

我们使用多维欧几里德空间的两点直线距离来定义新的状态空间中的两点距离. 设点 p_1 的坐标是 $(a_1, a_2, \dots, a_{n(n-1)})$, 点 p_2 的坐标是 $(b_1, b_2, \dots, b_{n(n-1)})$, 则两点的距离是

$$d(p_1, p_2) = \sqrt{(a_1 - b_1)^2 + (b_2 - b_2)^2 + \dots + (a_{n(n-1)} - b_{n(n-1)})^2}.$$

设路由方案 R_1 和 R_2 , 定义两个路由方案之间的距离为 $d(R_1, R_2) = d(H(R_1), H(R_2))$.

对于向量中的分量, 值越大表示所选的中转节点的中转能力就越强, 值为 0 表示没有中转节点, 值为 $n-2$ 表示选取了中转能力最强的节点. 虽然这样的状态空间重构并没有降低问题的复杂度(搜索空间大小不变), 但通过映射, 中转能力强的节点的坐标值就会较大, 原问题无序和不规则的状态空间变得相对有序和规则, 目标函数更加平滑, 搜索方向性更强. 有序的导向令搜索的效率得到提高.

4 Tabu 搜索算法的具体实现以及实验结果分析

我们对禁止表 TabuList 作了新的规定: TabuList 中的一个元素由两部分组成: (R, d_r) , 其中路由方案 R 和距离 d_r . 规定如果路由方案 R' 满足 $d(R, R') \leq d_r$, 则 R' 属于该元素的禁止范围.

候选方案集由当前解 x 的邻域中选取得到. 为了提高算法的效率, 我们对 x 的邻域作以下较简单的定义. 已知 $H(x) = (a_1, a_2, \dots, a_i, \dots, a_{n(n-1)})$, 定义 $N(x, i)$ 如下:

$$N(x, i) = \{(a_1, a_2, \dots, k, \dots, a_{n(n-1)}) \mid 0 \leq k \leq n-2 \text{ 且 } k \neq a_i\},$$

其中 $H(x)$ 中的第 i 个分量是 a_i , 上式的意义实际上是把 $H(x)$ 的第 i 个分量替换成其他所有的可能值, 这些新的向量组成 x 的邻域. 评估函数^[3,4] 作为目标函数 $z(x)$. 具体实现的 Tabu 搜索算法描述如下:

算法1. 具体实现的Tabu搜索算法.

随机产生一个可行路由方案 x^* , 目标函数值 $z^* := z(x^*)$, 令 $x := x^*$ 及 $z(x) = z^*$, 禁止表 $\text{TabuList} := \emptyset, y := \emptyset$ 循环:

```
while not ( $z^*$ 超过一定的目标值  $\text{max}_z$  或循环超过一定的次数  $\text{max\_loop}$ ) do
begin
```

(1) 生成候选方案集:

```
    随机选出  $k$  个互不相同的整数  $b_1, b_2, \dots, b_k (1 \leq b_j \leq n-1, 1 \leq j \leq k)$ 
    得到候选方案集合:  $\text{OpenList}(x) := \cup N(x, b_j), 1 \leq j \leq k$ 
```

(2) 选取最优方案:

```
    while  $\text{OpenList}(x) \neq \emptyset$  and 未选出最优方案  $y$  (即  $y$  为空) do
    (i) 从  $\text{OpenList}(x)$  选择最优方案  $y$ , 即  $z(y)$  最大.
    (ii) if  $y$  属于 TabuList 中任一元素的禁止范围 then
        令  $\text{OpenList}(x) := \text{OpenList}(x) - \{y\}; y := \emptyset;$ 
```

```

else
    if  $z(y) > z^*$  then  $z^* := z(y), x^* := y$  endif;
endif
endwhile
(3) 进行 TabuList 管理:
    if 找到最优方案  $y$  then 把  $(x, d(x, y) - 1)$  插入到 TabuList 中, 令  $x := y$  endif
endwhile

```

结果: x^* 是当前最佳路由方案, z^* 也就是其目标函数值.

算法中变量 k 关系到候选方案集的大小, 不同的问题规模 n 要选不同的 k . \max_z 是目标函数达到的最大值, 若方案目标函数值超过 \max_z , 则算法结束. \max_loop 是循环的最大次数, 针对不同的问题规模 n , \max_loop 相应地取不同的值. 禁止表 TabuList 是一个先进先出的队列, 要有固定的长度 $tabu_length$.

步骤(3)中插入到 TabuList 中的元素是 $(x, d(x, y) - 1)$, 即禁止的距离为 $d_r = d(x, y) - 1$. 实际的算法中还加了这样的策略: 如果循环 \max_try 次后, 当前解的目标函数值没有得到提高, 则随机将当前解中一半的路由改变, 再继续搜索. 这样可以令搜索更具广泛性. 各参数的合适值可以通过实验确定.

文献[3]中实现了遗传算法求解路由方案问题, 其原理也和 Tabu 算法一样. 利用目标函数(评估函数)在状态空间中搜索最优解. 所以在话务和中继条件相同的情况下, 可以直接通过比较所得路由方案的目标函数值和用时的长短来判断两种算法的优劣. 我们选择了广东省长话网的一些实际话务数据和实际中继情况作测试. 同时, 我们也制造了随机产生的具有严重溢出情况的中继和话务数据, 以模拟更严峻的网络状况.

我们测试了在具有 5 个和 10 个节点的小规模子网以及在具有 43 个节点的全网情况下两种算法的表现. 表 1 是两种算法计算 43 个节点网络的两次实验结果. 其中, 节点数 $n=43$; Tabu 算法参数: $k=3$; $\max_try=15$; $\max_loop=600$; $tabu_length=20$; 遗传算法参数: 进化代数=3000. 实验表明, 遗传算法的收敛速度比较慢, 而 Tabu 算法可以找到比遗传算法更好的解. Tabu 算法所用的时间都少于遗传算法. 其他规模网络的实验也有同样结果(参见文献[9]). 由实验结果可以得出结论: Tabu 算法能够在较短的时间内得到比遗传算法更好的结果.

Table 1 Results of Tabu search algorithm and genetic algorithm in computing the network of 43 nodes

表 1 Tabu 算法和遗传算法计算 43 个节点网络的结果

Ordinal	Index	Real data		Random data	
		Genetic algorithm	Tabu algorithm	Genetic algorithm	Tabu algorithm
1	Time used (s)	910	288	1 074	348
	Max evaluation value	0.064 4	0.097 8	0.102 4	0.208 5
2	Time used (s)	921	288	1 033	351
	Max evaluation value	0.067 4	0.092 8	0.101 0	0.227 6

实验序数, 指标, 实际数据, 随机数据, 遗传算法, Tabu 算法, 使用时间, 最高评估函数值.

5 总 结

针对电话网智能管理项目中动态路由策略的需求, 我们研究了使用 Tabu 搜索算法解决路由方案问题的方法. 实验证明, Tabu 算法的性能表现超过了已使用的遗传算法. Tabu 算法更适合于动态实时控制路由的要求, 为实现长途电话网的动态路由控制提供了更好的条件. 本算法正运行于广东省电话网智能管理系统中.

我们把路由方案问题的状态空间作了重构, 使得 Tabu 算法能够在新的相对有序的空间中进行更有方向性的搜索, 从而得到较好的结果. Tabu 算法是一个灵活的、扩展能力强的算法. 我们可以根据不同的问题条件和状态空间, 扩展基本 Tabu 算法中的一些概念, 调整算法中的一些参数, 令算法的适用范围更广. 但 Tabu 算法的表现比较依赖于目标函数和算法参数的设定, 不少参数需要通过实验确定, 这在一定程度上限制了算法的运用.

应该指出, 如果对电话网模型稍作改动, 改为数据网模型, 本文提出的方法也同样适用. Tabu 搜索算法还可以用于其他路由问题上.

References:

- [1] Ash, G.R., Kafker, A.H., Krishnan, K.R. Servicing and real-time control of networks with dynamic routing. *Bell System Technical Journal*, 1981,60(8):1821~1845.
- [2] He, Jian-wei. The synthetic research of several dynamic routing strategies in telecommunication networks [MS. Thesis]. Beijing: Posts and Telecommunications Science Institute of Ministry of Posts and Telecommunications, 1997 (in Chinese).
- [3] Wang, Hai. The analysis of call loss in Guangdong telecommunication network and its solution [MS. Thesis]. Guangzhou: Software Institute of Zhongshan University, 1999 (in Chinese).
- [4] Zhang, Zan-bo, Li, Lei. A dynamic routing strategy of telecommunication based on genetic algorithm. *Journal of Nanjing University (Physical Science)*, 2000,36(11):136~142 (in Chinese).
- [5] Glover, F. Tabu search——Part I. *ORSA Journal on Computing*, 1989,1(3):190~206.
- [6] Glover, F. Tabu search——Part II. *ORSA Journal on Computing*, 1990,2(1):4~32.
- [7] Xu, Jie-feng, Chiu, S.Y., Glover, F. Optimizing a ring-based private line telecommunication network using Tabu search. *Management Science*, 1990,45(3):330~345.
- [8] Zhang, Hong-bin, Sun, Guang-yu. The application of Tabu search on feature selection. *Journal of Automation*, 1999,25(4):457~466(in Chinese).
- [9] Shao, Liang. The application of Tabu search on telecommunication network intelligence management [MS. Thesis]. Guangzhou: Software Institute of Zhongshan University, 2001 (in Chinese).

附中文参考文献:

- [2] 何建伟.电话网几种动态路由策略的综合研究[硕士学位论文].北京:邮电部邮电科学研究院,1997.
- [3] 王海.广东省长话网呼损原因分析及其解决方法[硕士学位论文].广州:中山大学软件研究所,1999.
- [4] 张赞波,李磊.基于遗传算法的电话动态路由策略.《南京大学学报(自然科学)》,2000,36(11):136~142.
- [8] 张鸿宾,孙广煜.Tabu 搜索在特征选择中的应用.《自动化学报》,1999,25(4):457~466.
- [9] 邵亮.Tabu 搜索算法在电话网智能管理中的应用[硕士学位论文].广州:中山大学软件研究所,2001.

Application of Tabu Search Algorithm in Telecommunication Network Intelligence Management*

SHAO Liang¹, LI Lei¹, CHEN Chang-juan²

¹(Software Institute, Zhongshan University, Guangzhou 510275, China);

²(Guangdong Telecommunication Company, Guangzhou 510000, China)

E-mail: L_Siu@163.net

<http://www.zsu.edu.cn>

Abstract: Tabu search algorithm is studied to solve the routing scheme problem which arises from the implementation of dynamic routing in the Telecommunication Network Intelligence Management System. Tabu search algorithm is improved in order to be suitable for solving circuit automatic adjustment problem and results satisfying answers. The improved Tabu search algorithm can work out global optimization route schemes in shorter time than the genetic algorithm. This algorithm is running in the Guangdong Telecommunication Network Intelligence Management System.

Key words: Tabu search; telecommunication network management; dynamic routing; combinatorial optimization problem; genetic algorithm

* Received December 9, 2000; accepted December 13, 2001